

## 수평자계가 Bi-2223테이프의 자화손실에 미치는 영향

한형주\*, 류경우\*, 최병주\*\*  
\*전남대학교, \*\*서라벌대학

### The Influence of Parallel Magnetic Field on Magnetization Loss in a Bi-2223 Tape

Hyung-Ju Han\*, Kyung-Woo Ryu\*, Byung-Ju Choi\*\*  
\*Chonnam National University, \*\*Sorabol College

kwryu@chonnam.chonnam.ac.kr

**Abstract** - Magnetization loss of a Bi-2223 tape in magnetic fields parallel to the tape surface was measured by a magnetization method. The results indicate that the magnetization loss is hysteretic because the measured loss agrees well with calculated one from a critical state model. In the full field penetration case the magnetization loss increases with the frequency but in the partial field penetration case the influence of the frequency is opposite.

#### 1. 서 론

교류 초전도시스템에 사용되는 초전도선재의 교류손실에는 자속운동에 기인하는 히스테리시스 손실과 초전도필라멘트 사이의 모재를 통해 흐르는 전류에 의한 결합손실이 그 주된 손실이며, 초전도선재에 흐르는 교류전류에 의한 손실을 통전손실(또는 자기자계손실), 외부교류자장에 의한 손실을 자화손실이라 한다. 이와 같은 손실은 교류 초전도시스템의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 손실을 냉각시키기 위해 본질적으로 효율이 낮은 저온냉동기의 도입을 초래하여 초전도시스템의 경제성을 떨어뜨리는 주요한 요인으로 작용한다. 따라서 초전도시스템 응용에 앞서 먼저 운전 온도가 높아 효율이 비교적 좋은 저온질소냉동기의 사용이 가능한 장점을 지닌 고온 초전도체에 대한 손실 연구를 통해 이들 중 중요한 손실이 무엇인지를 밝혀야하며, 또한 시스템의 효율 및 경제성 향상을 위한 이들 손실의 저감법 등에 대한 연구가 선행되어야한다. 이와 같은 목적을 달성하기 위한 하나의 접근 방법으로서 본 연구에서는 상기의 2가지 손실 중 고온 초전도테이프의 자화손실 측정과 관련된 기본적인 제반 문제들을 검토·분석하였으며, 이를 바탕으로 측정된 Bi-2223테이프의 자화손실 특성에 대한 분석 및 이론적 검토를 하였다.

#### 2. 실험 샘플 및 실험 방법

##### 2.1 실험 샘플

실험에 사용된 Bi-2223테이프의 사양을 표1에, 이들의 자화손실을 측정하기 위해 설치한 픽업코일의 배열을 그림1에 각각 나타내었다. 일반

Table 1. Specifications of a Bi-2223 tape

항 목	특 성
테이프 사이즈(mm <sup>2</sup> )	3.5 × 0.3
코어 사이즈(mm <sup>2</sup> )	3.3 × 0.22~0.3
필라멘트 사이즈(μm <sup>2</sup> )	180~420 × 15~55
Bi-2223/AgMgNi	25/75
필라멘트수	37
트위스트피치	∞

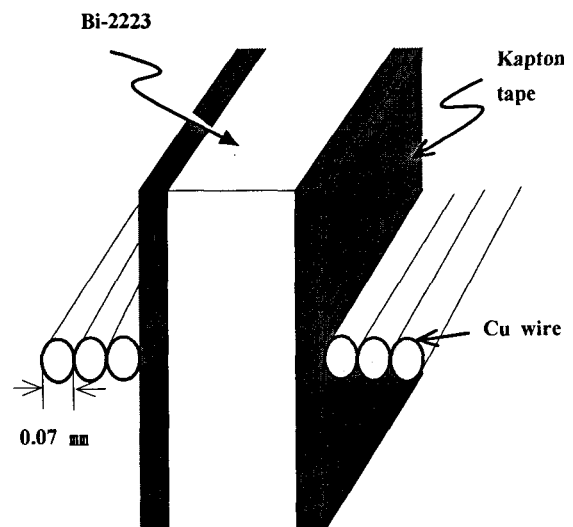


Fig. 1. Arrangement of a pick-up coil.

적으로 픽업코일을 사용하여 자화손실을 측정하는데 있어서는 픽업코일의 배열 및 샘플 길이에 따라 측정된 손실이 상이하다고 알려져 있다

[1],[4]. 본 측정에서는 샘플 길이를 50 mm, 픽업코일의 배열은 그림1과 같은 2차원적인 배열을 사용하였다.

## 2.2 실험 방법

Bi-2223테이프의 자화손실 측정에 사용된 실험장치를 그림2에 나타내었다. 그림2에서 30 A, 50 V 전원(DC - 1 kHz)을 함수발생기로 제어하여 외부자장 발생을 위한 철심자석에 정현파의 전류를 인가하였으며, 자석상수는 25 mT/A, 공극은 45 mm×100 mm×8 mm, 자석 사이즈는 133 mm×100 mm×186 mm이다. 그림1의 실험 샘플을 자석의 공극에 배치하여 자장을 Bi-2223테이프에 인가하고, 자화곡선을 측정하는데 불필요한 외부자장은 공심형 상쇄코일을 이용하여 상쇄시켰고, 픽업 및 상쇄 코일 양단에 유도되는 전압을 자속계(또는 적분기라 함; 10 - 5000 Hz, F.S는 3 V)에 입력시킴으로서 단위체적 당 자기쌍극자모멘트로 정의되는 자화(M)를 측정하여 Bi-2223테이프의 자화곡선을 최종적으로 얻었으며, 수치적분을 이용하여 자화곡선의 면적을 계산하였다. 또한 본 자화손실 측정에 사용된 실험장치의 노이즈를 검토한 결과 상온에서 자속계의 입력단을 단락시켰을 때 자속계의 노이즈는 약 5 mV, 그림2에서 가장 큰 노이즈를 발생시킬 것으로 예상되는 전원의 주 스위치를 닫은 상태에서도 자속계의 노이즈 레벨은 약 5 mV로 일정하였으며, 자화손실 측정 시 가장 작은 자속계의 출력신호 전압의 피크 치는 약 20 mV였다.

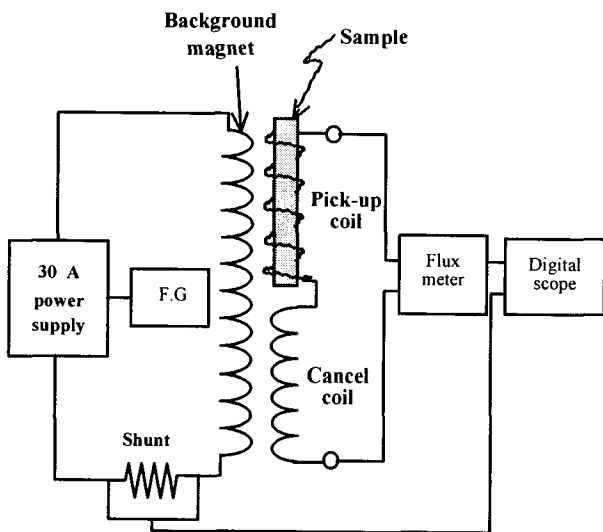


Fig.2. Experimental set-up.

이상의 자속계로부터 측정된 자화 신호는 왜형 파로서 주파수 영역에서 스펙트럼을 분석한 결과 정현파의 외부자장과 동일한 주파수인 기본파 성분이 지배적이었고, 무시할 수 있을 정도의 기수 고조파 성분도 존재하였다. 또한 자화 신호 중

외부자장과 90도 위상 차가 나는 기본파 성분과 외부자장으로부터 얻어지는 자화곡선으로부터 계산된 면적이 자속계로부터 직접 얻은 자화곡선으로부터 계산된 면적과 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

그림3에는 50 Hz의 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 자화곡선을 나타내었다. 그림3의 결과에서 외부자장이 작은 경우 자화자속 밀도( $-\mu_0 M$ )는 자장이 증가해도 포화되지 않는 반면 외부자장이 큰 경우는 포화되며, 자화곡선의 형태도 상이하게 됨을 볼 수 있다[2].

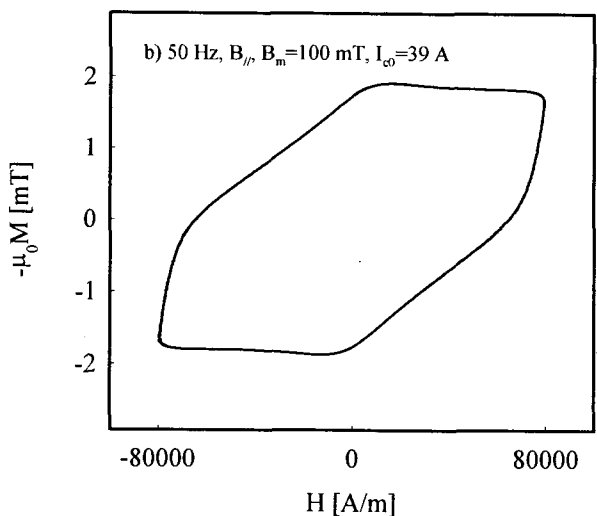
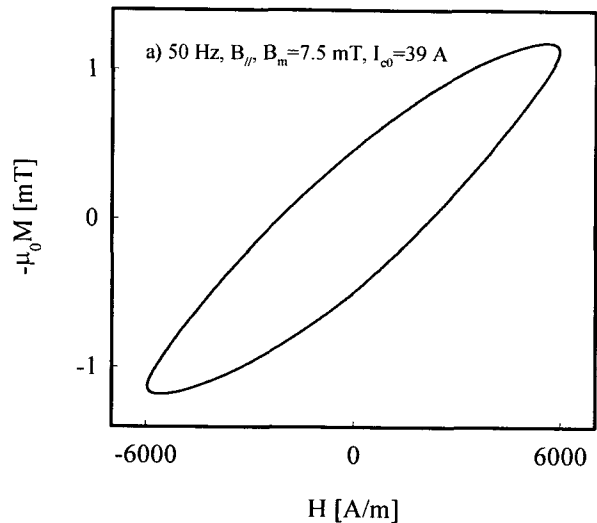


Fig. 3. Measured magnetization curves at 50 Hz. a) Low field. b) High field.

그림4에는 50 Hz의 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 단위체적 당 자화손실 - 외부자장 사이의 관계를 나타내었다. 그림4에서 단위 체적은 필라멘트 영역의 체적을, 외부자장은 피크 치를 각각 나타내며, 단위체적 당의 초

전도체에서 발생되는 히스테리시스 손실은 slab 형 초전도체와 같은 간단한 형상에 대해서는 Bean의 임계상태모델로부터 간단히 계산될 수 있으며, 그 결과를 식(1)에 나타내었다(2).

$$Q_H = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p} \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}] \quad \text{식(1)}$$

$$Q_H = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left(1 - \frac{2B_p}{3B_m}\right) \quad [\text{J/m}^3/\text{cycle}]$$

$$B_p = \mu_0 J_c a \quad [\text{T}]$$

여기서  $B_m$ 은 외부자장의 피크 치,  $\mu_0$ 는 진공 중의 투자율,  $B_p$ 는 완전침투자장,  $J_c$ 는 임계전류밀도,  $2a$ 는 slab의 두께를 각각 나타낸다. 그림4에는 식(1)로부터 계산된 자화손실을 실선, 파선 및 점선으로 각각 나타내었으며, 실선의 경우는 필라멘트영역 전체를 하나의 초전도slab으로(이하 코아 모델이라 함), 파선 및 점선의 경우는 표1에서 보는 바와 같이 필라멘트 두께의 이산도를 고려하여 초전도slab의 두께를  $60 \mu\text{m}$  및  $20 \mu\text{m}$ 로(이하 필라멘트 모델이라 함) 하여 계산한 결과를 각각 나타내었다. 또한 상기의 이론 계산에서 임계전류밀도는 외부자장이 테이프 측에 수직인 방향으로 인가되기 때문에 외부자장에 의한 차폐전류 즉 임계전류밀도의 방향은 일반적으로 테이프의 임계전류를 측정할 때 이용되는 자기자장에서 측정된 테이프 측 방향의 임계전류를 필라멘트영역의 면적으로 나눈 임계전류밀도로 하였다.

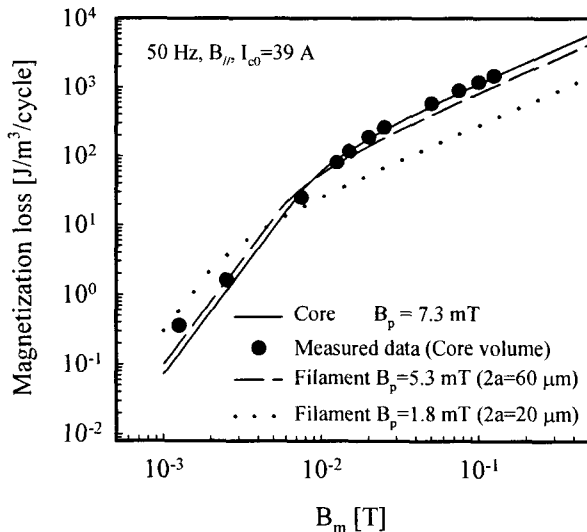


Fig. 4. Magnetization loss vs. peak applied field at 50 Hz.

그림4의 결과로부터 완전침투자장보다 작은 자장에서 측정치와 계산치 사이의 약간의 차이는 있지만 전 영역에 걸쳐 코아 모델 및 slab 두께를  $60 \mu\text{m}$ 로 한 필라멘트 모델로부터 계산된 자화손실은 측정치와 비교적 잘 일치하는 반면 slab 두께를  $20 \mu\text{m}$ 로 한 필라멘트 모델로부터

계산된 자화손실은 측정치와 상당히 상이함을 알 수 있고, 이와 동일한 결과를 다수의 다른 연구 결과에서도 볼 수 있다[3]-[4].

그림5에는 상이한 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 단위체적 당 자화손실 - 주파수 사이의 관계를 나타내었다. 그림5에서 ● 및 ○는 외부자장이 완전침투자장보다 큰 경우(25 mT) 및 작은 경우(7.5 mT)의 실험결과를 각각 나타내었다.

그림5의 결과로부터 완전침투자장보다 큰 외부자장에 대해서는 주파수의 증가에 따라 측정된 자화손실도 비례하여 커지는 반면 이보다 작은 외부자장에 대해서는 주파수의 증가에 따라 자화손실이 반비례하여 작아지는 것을 알 수 있고, 이와 동일한 결과를 다수의 다른 연구 결과에서도 볼 수 있다[5]-[7]. 또한 그림4에서 측정된 자화손실과 Bean모델로부터 계산된 손실이 비교적 잘 일치하는 것은 그림5에서 측정된 자화손실은 히스테리시스손실을 의미하며, 그림5에서와 같은 히스테리시스손실의 주파수 의존성은 기존의 저온초전도체의 히스테리시스손실을 이론적으로 설명하는 데 보편적으로 사용되고 있는 임계상태모델( $0 \leq J \leq J_c$ 인 경우는  $E=0$ ,  $J \geq J_c$ 인 경우는  $E = \rho_f(J - J_c)$ ,  $\rho_f$ 는 자속유동저항률)로서는 설명할 수 없다. 따라서 저온 초전도체의 전압 - 전류특성과 매우 상이한 고온 초전도체에 대해서는 임계상태모델의 적용이 부적합하기 때문에 n-value모델 또는 일반화된 임계상태모델(generalized critical state model) 등이 제안되고 있으며, 이와 같은 모델로부터 계산된 손실은

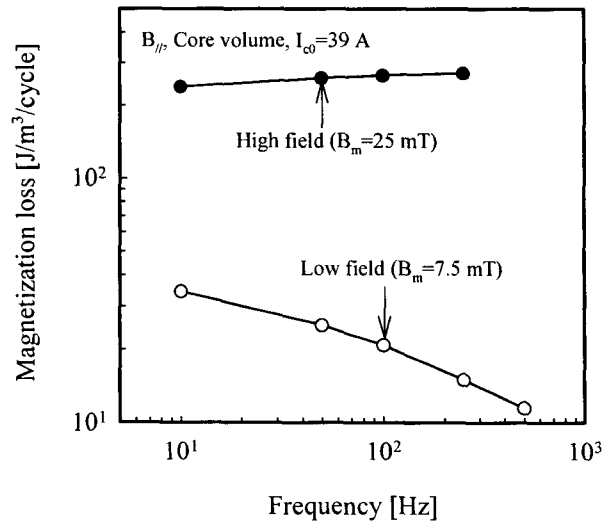


Fig. 5. Magnetization loss vs. frequency for different applied fields.

그림5의 실험결과에서와 같은 히스테리시스손실의 주파수 의존성을 이론적으로도 잘 설명하고있다[5].

#### 4. 결 론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 측정된 자화손실은 코아 모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하였으며, 이는 측정된 자화손실은 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다.
- 2) 측정된 히스테리시스손실은 주파수에 의존하며, 이와 같은 특성은 기존의 임계상태 모델로는 설명이 불가능하다. 따라서 저온 초전도체의 전압 - 전류 특성과 매우 상이한 고온 초전도체의 경우에 있어서는 새로운 모델(n-value모델 또는 일반화된 임계상태모델 등)이 요구되고있다.

without Transport Current," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*. Vol. 9, No. 2, pp. 2565-2568, 1999.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (과제 번호 : 2000-2-30200-002-3)지원으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] Kengo Miyamoto, Naoyuki Amemiya, Nobuya Banno, Masayasu Torii, Eiki Hatasa, Eiji Mizushima, Tomoyuki Nakagawa, "Measurement and FEM Analysis of Magnetization Loss in HTS Tapes," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*. Vol. 9, No. 2, pp. 770-773, 1999.
- [2] Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, New York and London, pp. 280-283, 1994.
- [3] 심정욱, 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 전기학회논문지, 48B권 4호, pp. 182-186, 1999.
- [4] Masahiro Sugimoto, Akio Kimura, Masanao Mimura, Yasuzo Tanaka, Hideo Ishii, Shoichi Honjo, Yoshihiro Iwata, "Electromagnetic interfilament coupling of silver-sheathed Bi-2223 multifilamentary tapes in transverse AC magnetic fields," *Physica C*, pp. 225-232, 1997.
- [5] K. Yamafuji, T. Wakuda, T. Kiss, "Generalized critical state model in high- $T_c$  superconductors," *Cryogenics*, Vol.37, No. 8, pp. 421-430, 1997.
- [6] Naoyuki Amemiya, Osami Tsukamoto, Masayasu Torii, Marian Cizek, Hideo Kawasaki, Eiji Mizushima, Sadato Ishii, "Filament Decoupling and Magnetization Loss of Multifilamentary Bi2223 Superconducting Tapes," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*. Vol. 10, No. 1, pp. 1204-1207, 2000.
- [7] Nobuya Banno, Naoyuki Amemiya, Akihiko Mihoichi, Marian Cizek, "Penetration Loss in BSCCO Tapes